

加速器の過去・現状

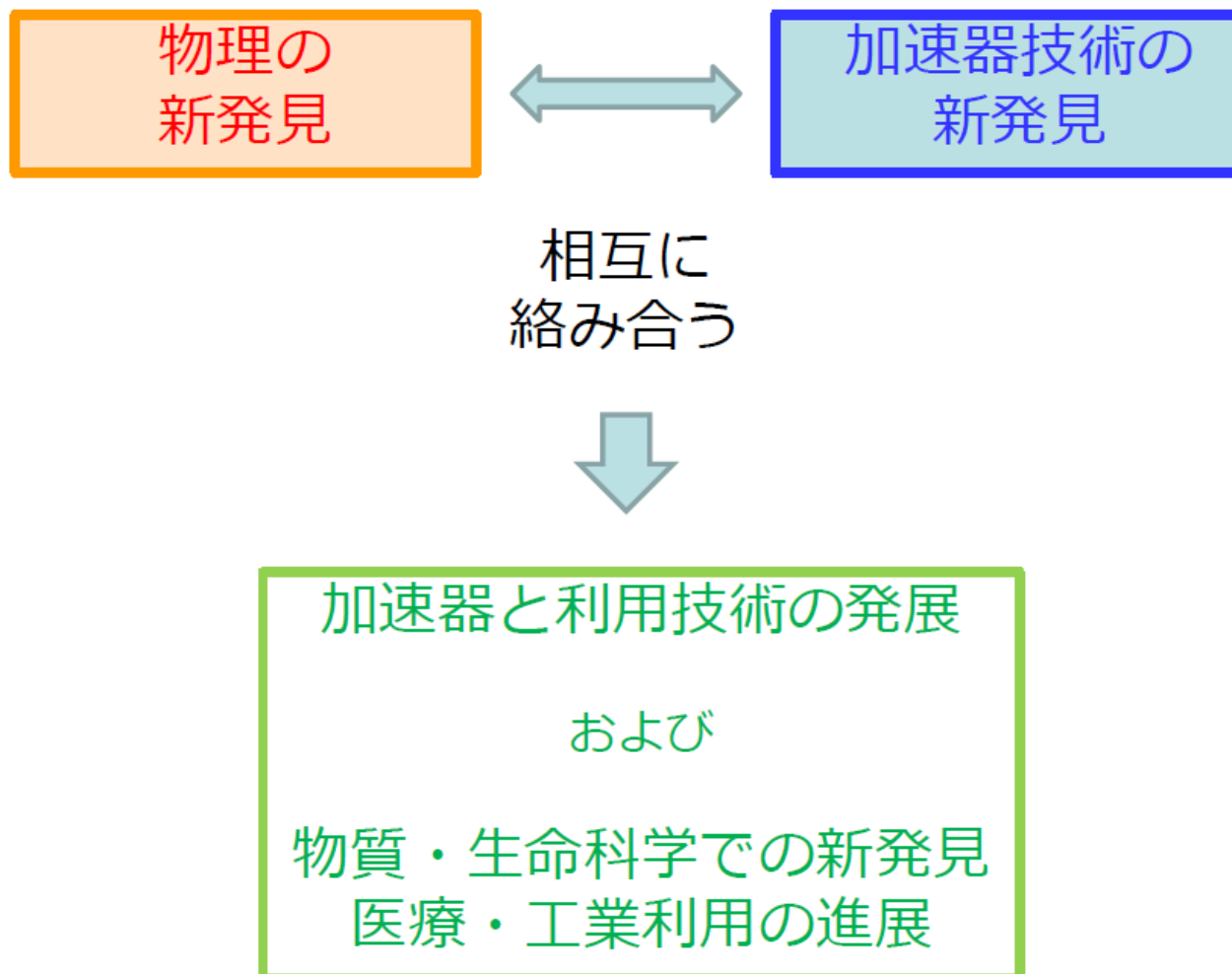
そして未来へ

高輝度光科学研究センター
名誉フェロー

理化学研究所
名誉研究員

熊谷教孝

加速器開発の原動力



加速器の始まり(1930年頃) → 100年後 現在

原子核を理解する実験装置として開発

サイクロトロン



直径約10cm

円形の高周波加速器
高I化が容易

1931年、陽子を80kVに加速。
1936年人工放射性元素 (Tc)の
生成に成功

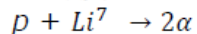
1939年ローレンス等：ノーベル
物理学賞

コックロフト・ウォルトン

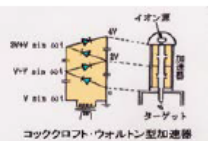


直線の直流加速器
高強度化が容易

1932年、陽子を600kVに加速、
人工核壊変に成功



1951年コックロフトとウォル
トン：ノーベル物理学賞



コックロフト・ウォルトン型加速器

簡単な構造で、医療・工業用として必要な
エネルギーとビーム強度が得られるため、
現在でも、広範分野で活用が進んでいる

学術産業医療等広範な分野で不可欠な基盤施設に発展

物質の根源を識る

LHC(CERN)



LHC (陽子・陽子衝突型リング)
周長27km(ほぼ山手線一周と同じ
長さ)で陽子を7TeVに加速 ヒッ
グス発見、2013年ヒッグス等：
ノーベル物理学賞

物質・生命科学
および産業利用

SACLA



J-PARC



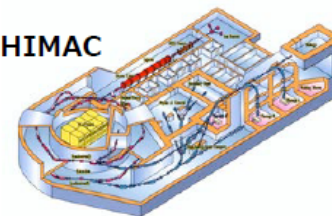
先端大型基盤施設



SPring-8

医療・工業利用

HIMAC



粒子線がん治療施設等

非破壊検査
RI製造
滅菌
架橋等

加速器の利用形態

物質・生命科学
人工光合成
タンパク構造解析
水の科学

PS II の構造を解明



医薬品



タンパク質の構造解析 高性能な低燃費
による高効率創薬 タイヤの開発

低燃費タイヤ



産業利用
排ガス触媒
省エネタイヤ
ヘルスケア

排ガス触媒



ヘアケア用品



社会を革新
電気自動車
電気飛行機
高性能電池

二次電池

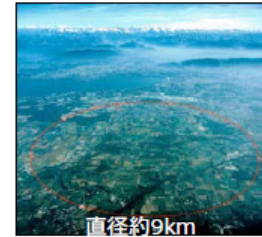


燃料電池




物質・生命の起源
宇宙の成り立ち

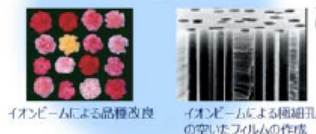
LHC (陽子・陽子衝突型リング)



学術・産業利用
型加速器
1GeV以上
大型施設
km以上

医療等社会還元型
加速器
数10~数100MeV/u
小型装置
中型施設

工業利用型加速器
10MeV程度以下
小型装置



育種 (品種改良)
新機能材
滅菌・殺菌,
重合、架橋

電子顕微鏡
セキュリティ
荷物検査
非破壊検査



RIBF
(超伝導リングサイクロトロン)



群馬大重粒子線加速器



医療
診断、薬剤製造
ガン治療



名古屋大学年代測定総合研究センター

質量分析器 年代測定



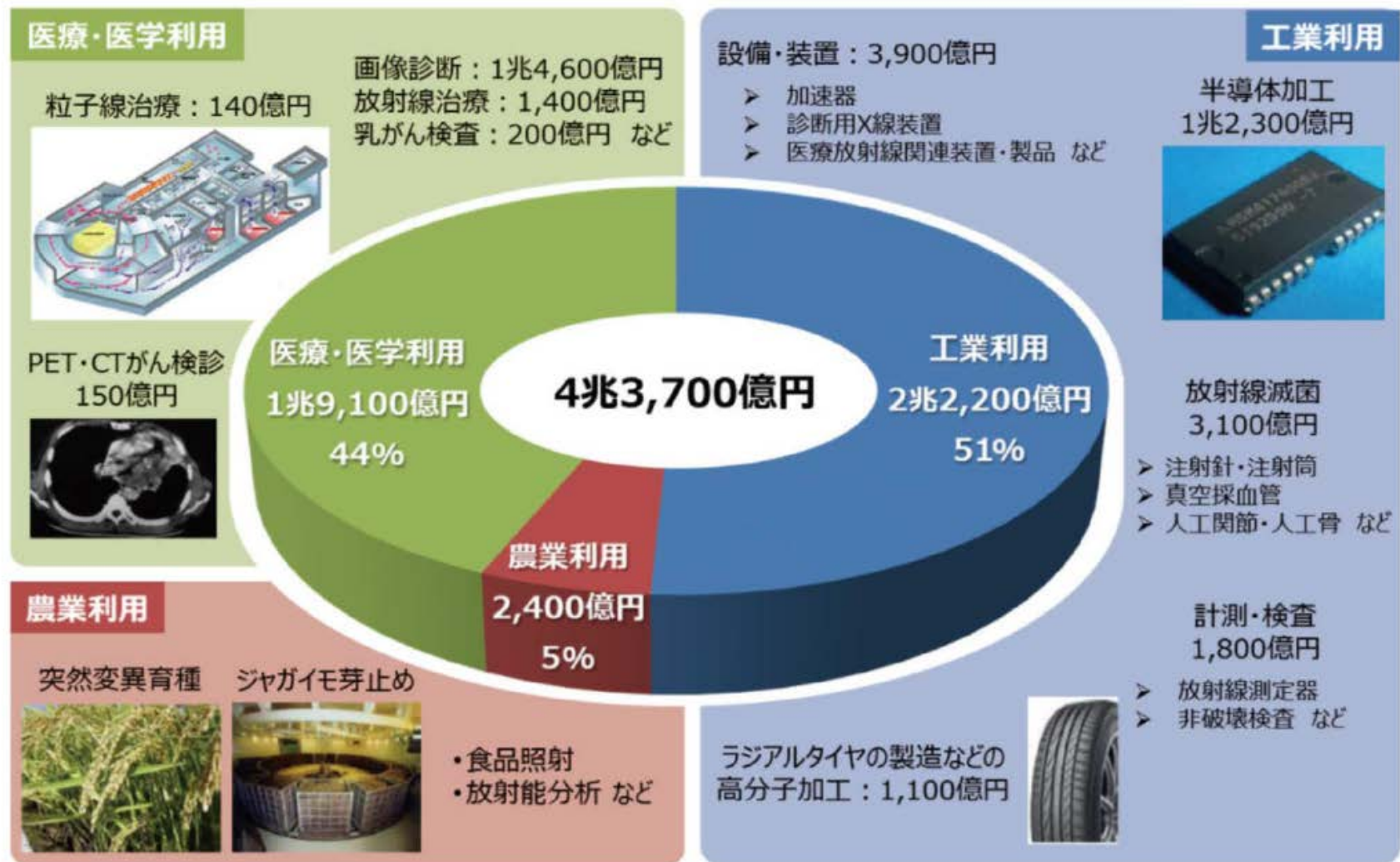


図 7-4 2015 年度の我が国における放射線利用の経済規模

(出典) 第 29 回原子力委員会 資料第 1-1 号 内閣府「放射線利用の経済規模調査」(2017 年) [5]

基盤施設としての利用を可能とした加速器の特長

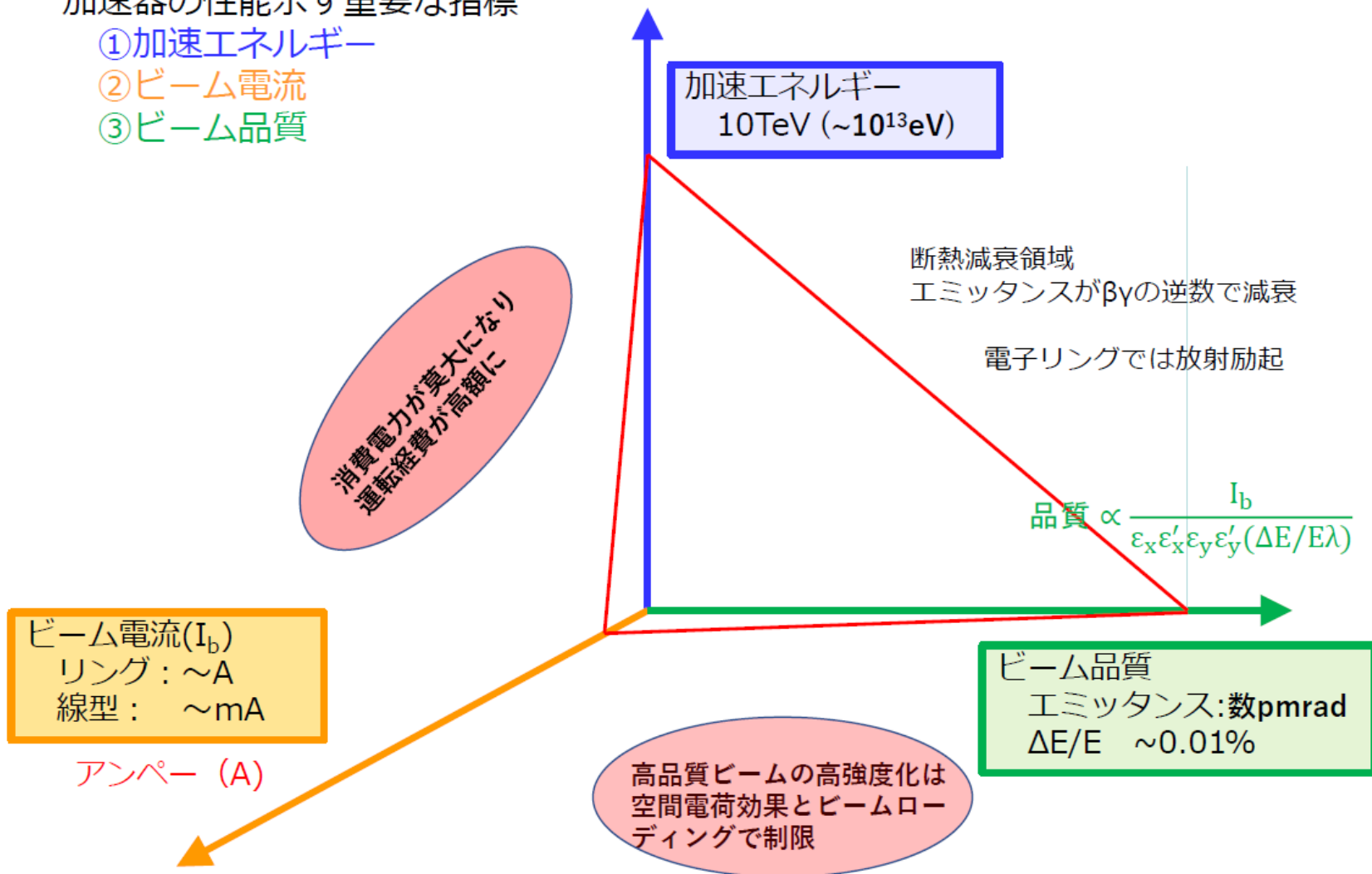
利用分野に最適化された加速器システムの開発
と
高品質で安定なビームと低故障率の加速器システムの実現
で
多様な分野で利用され成果を創出

学術、産業、医療、工業等、多様な分野での進展に
不可欠な基盤施設

加速器は使って “なんぼ” の装置

加速器の性能示す重要な指標

- ① 加速エネルギー
- ② ビーム電流
- ③ ビーム品質



現状の加速器性能と将来計画

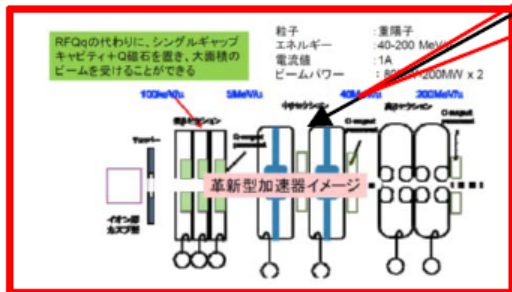
稼働中
常伝導および超伝導rf空洞や電磁石、
J-PARC ESS



ESS 5MW(中性子利用)
CW-linac 2GeV×2.5mA

投入高周波電力が莫大
になり非現実的

LLFP計画 (核変換) (超伝導ライナック)
40-200MeV/u、1A
ビームパワー：200MW
大口径 1mφ



FCC, CEPC (計画)
周長100km
陽子: ~30TeV



LHC 周長27km
陽子: 7TeV
超伝導電磁石

衝突型加速器

$$Luminosity = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

$$L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



ILC 全長20km
電子: 125×125GeV
SC-linac

CLIC 11km
x-band linac



SACLA (FEL) 8GeV, 1nC/b 50Hz
SPring-8 (放射光) 8GeV, 100mA

常伝導加速器

$$Brilliance = \frac{N_{ID} I_b}{\Sigma_x \Sigma'_x \Sigma_y \Sigma'_y (\Delta\lambda/\lambda)} \times AF$$

Br ~ 10^{21~22} 100mA程度

~数10pmrad

高品質化と高強度化の両立

これからの課題



Euro-FEL
20GeV
30,000p/s
超伝導linac

電荷量 数nC/b

加速器の高エネルギー化および小型化に向けた課題

①加速器施設の巨大化

ILC計画 (250GeV×250GeV) : 加速器の長さが20~30km

地球上での建設には早晚加速器の長さで限界に 最長で100km程度か

②高額な建設費と運転経費

ILC計画 : 6500億@250GeV SPring-8 : 1000億 (加速器のみ)

HIMAC(重イオンがん治療装置) : 320億

超伝導技術等の先端技術を駆使し、加速器の小型化や建設費の低コスト化が進められているが、既存の技術の延長線上では、さらなるエネルギーフロンティアへの飛躍は困難

この飛躍を可能とする革新的な加速方式として、
1979年 田島俊樹等によってレーザープラズマ加速方式が提唱された

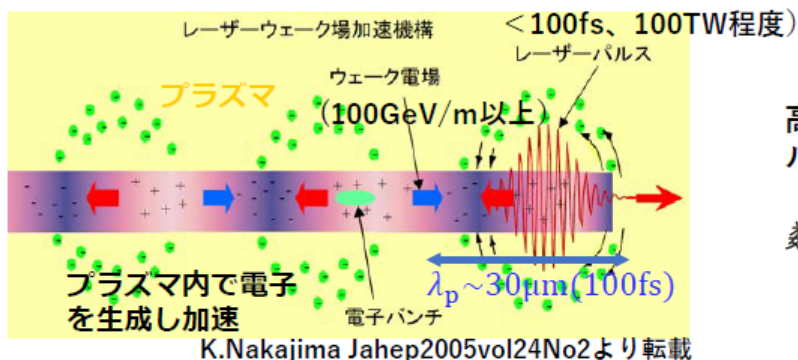
通常型加速器の1000倍以上の加速電界強度が可能

2017-2026 レーザープラズマ駆動型加速器プロジェクト (MIRAI)
現在世界各国で開発が進んでいる。

レーザープラズマ加速の原理

電子等：レーザーウエーク場加速(LWFA)
 超短パルス高強度レーザーでプラズマ内に誘起する
 100MeV/m以上のウエーク場で相対論的荷電粒子($\beta \sim 1$)
 を高周波加速

→ 多段加速方式で高エネルギー化、大強度化が可能

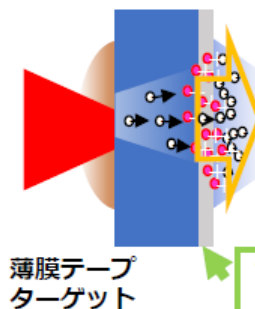


準静的シース場で荷電粒子を加速(TNSA)
 数$10\mu\text{m}$以下の薄膜上に数10nm厚の加速イオン種を塗布
 表面から高強度レーザーを照射、裏面に発生するTeV/mの
 シース場で加速

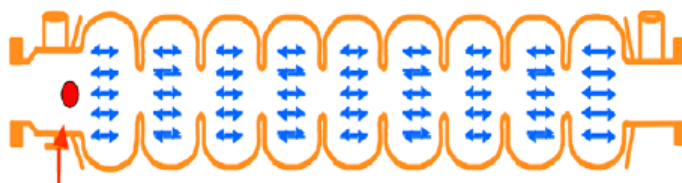
電子輸送による
 デバイシース場の形成
 time < pulse duration

高強度超短パ
 ルスレーザー

数10fs
 数100TW



Lバンド超伝導加速管



外部加速器からの高品質
 電子ビームを入射・加速

115.4mm

$$V_{\text{acc}} \sim \int (n_e(z_e, t) - n_{\text{ion}}(z_i, t)) dt$$

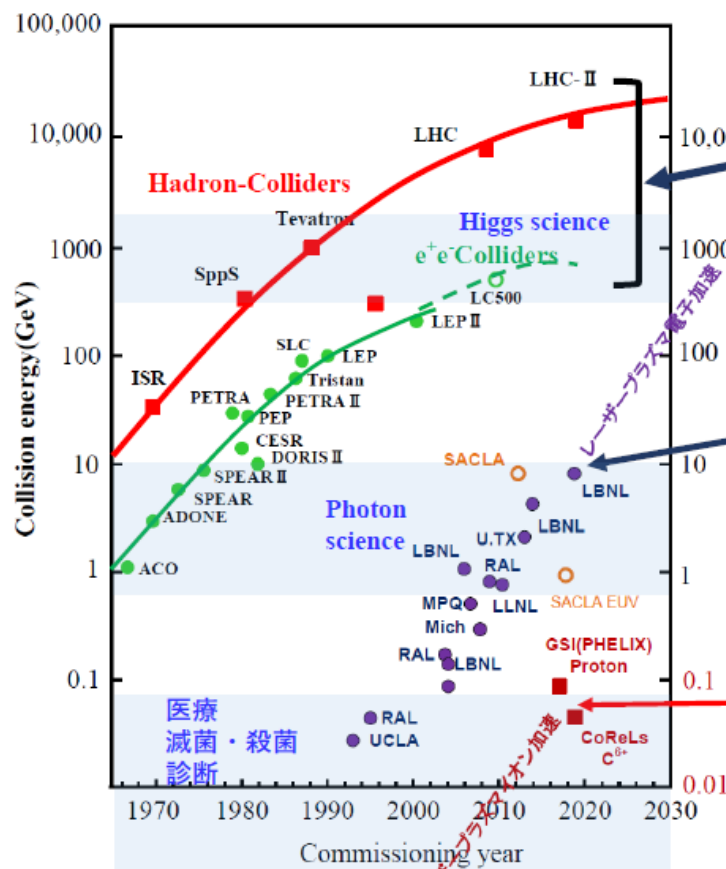
target normal sheath acceleration (TNSA)

加速電界強度が通常型加速器に比べ4から5桁高い

高エネルギー化と超小型化が可能

レーザープラズマ加速器開発の進捗状況

加速エネルギーはそれなりの水準に到達

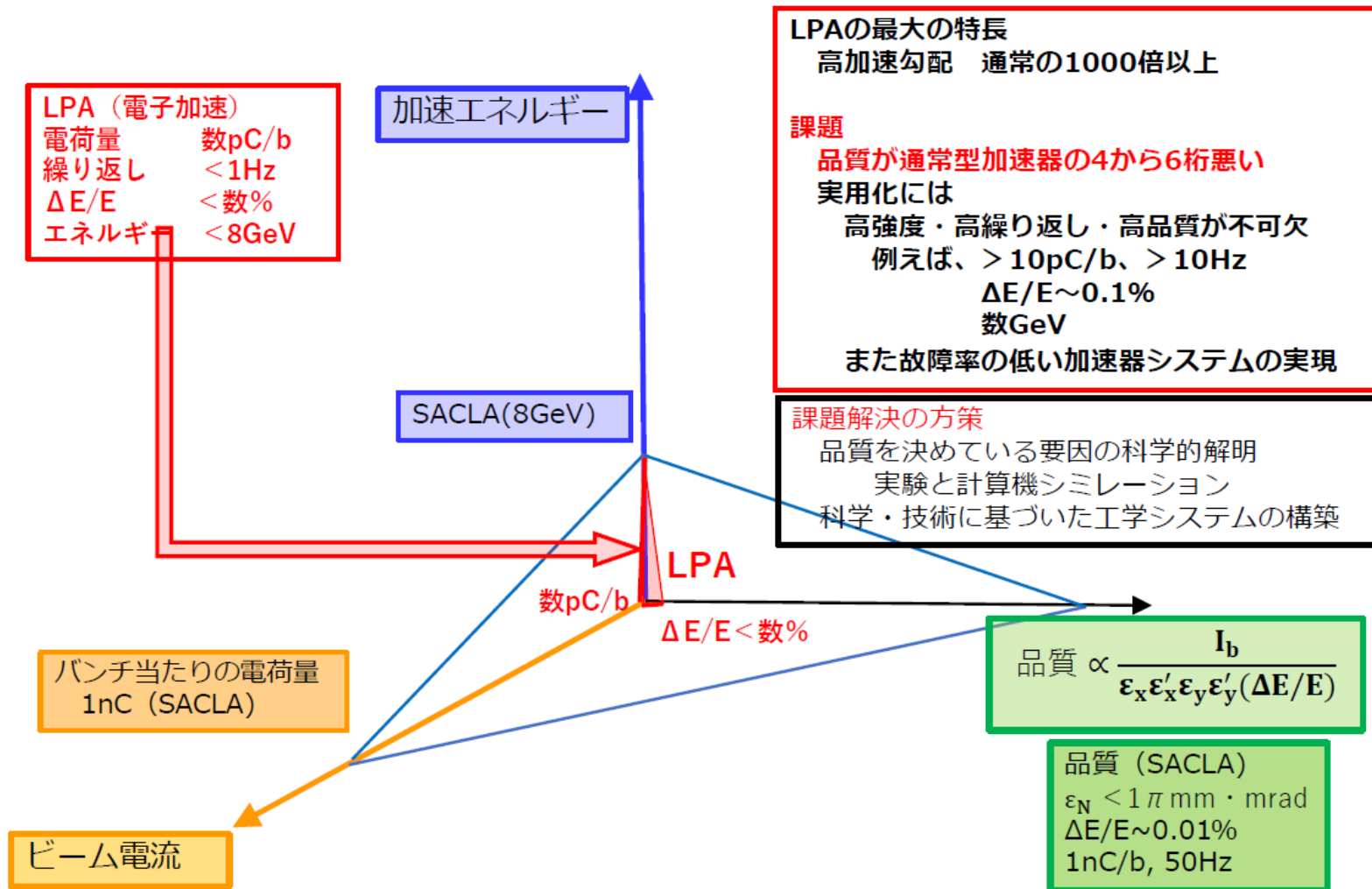


電子およびハドロン衝突型加速器は大きさと高額な建設予算により加速エネルギーが限界に近い

LBNL(BELLA, 2019)
 電子加速エネルギー：7.8GeV,
 $\Delta E/E$: <6%(FWHM)
 電荷量/bunch : 5pC/p
 レーザー : 40J,40fs
 プラズマ密度 : $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度
 capillary長 : 20cm (径800 μm)
 multi-GeVでsub-PW程度、
 1~2GeV程度なら100TW程度

CoReLS(2019) TNSA+RPA
 C⁶⁺ <48MeV/u CNF+DLC(20nm)
 粒子数 : $10^9/\text{MeV}/\text{sr}$
 C⁶⁺ : $\sim 4.5 \text{MeV}/\text{u}$ CNF(80 μm)
 粒子数 : $10^{11}/\text{MeV}/\text{sr}$
 レーザー : 9.2 J, 33fs s-polarized
 エネルギースペクトル : 白色

LPAの特長と技術的課題



レーザープラズマ加速器が既存加速器に比べて有利な点 (例として電子加速、イオン加速入射器)

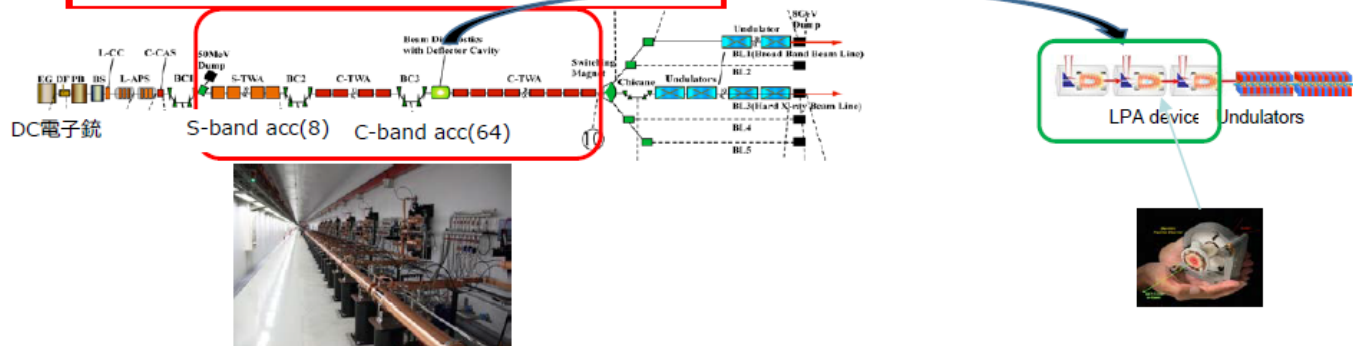
既存加速器システム 精密機械加工等高い製造技術を要する機器の数が多い
 高周波、加速空洞、電磁石、電源、真空、制御、タイミング・診断、軌道制御、軌道解析、
 データ収集系、機械加工技術等、多くの科学技術を統合した施設

加速器建設：一国の科学技術の水準を図るバロメータ

LPAシステムの利点 ①加速電界が3桁以上高いため、構成機器の数が通常型に比べ大幅に少ない
 ②精密加工技術を要する機器数が通常の数10分の1と少ない

SACLA : 電子生成・加速部+主加速器64ユニットで構成
 加速エネルギー：~9GeV、1nC/パルス、60Hz
 全長：400m

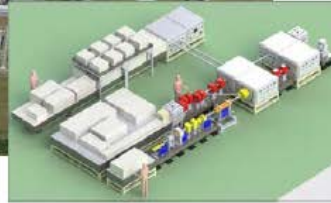
LPA型：電子生成+加速器：数ユニットに簡略化
 全長:数m程度 + ビームダンプ



安定なレーザーとプラズマの生成・精密制御技術と、取り扱う空間がミリからミクロンへ狭小化に伴うタイミングシステムやビーム診断装置の高精度制御および検出技術が確立すれば、

構成要素数の大幅な低減で、新規企業でも容易にテーブルトップサイズの加速器システムの製作が可能となり新規利用分野の開拓等と併せて大きなビジネスチャンスを開き切る事が可能となる。

LPAの未来展望



LPAの研究開発は20年ほど

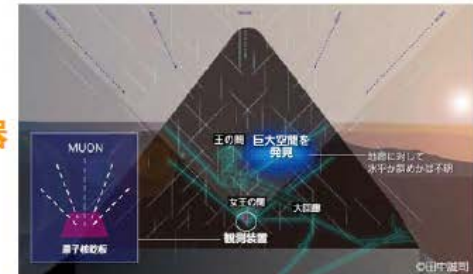
人間で言えばやっと成人したころ

レーザープラズマ
電子加速器開発



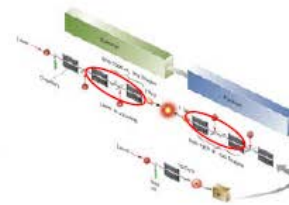
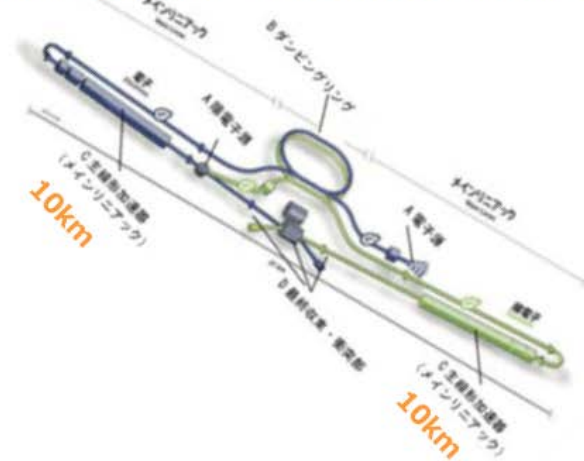
可搬式加速器

ミューオン透視



■ 図1 女王の間の2つの異なる場所に原子核形成を観測し、天頂方向から±45度を観測した。2か所の画像を組み合わせることで、幾何学図を応げるとともに、より詳細に分析できる。新空洞の正確な位置や構造の決定は今後の課題だ。

ILC計画
超伝導加速器 250GeV×250GeV 全長30km

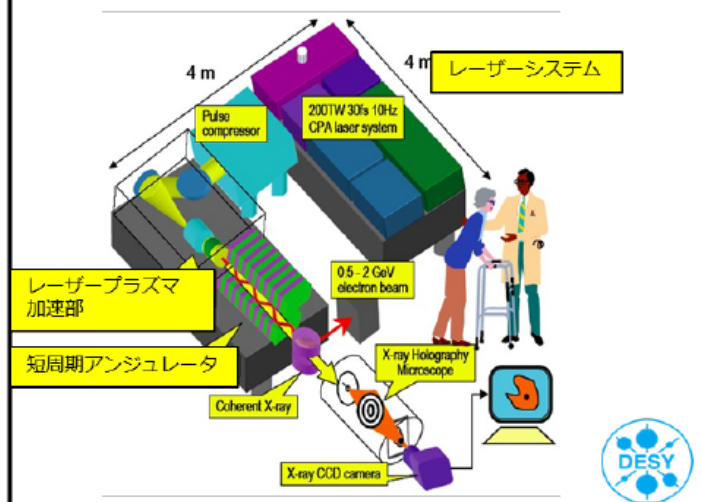


LPA 1TeV×1TeV 全長数km
主加速器長~500m

LPAで
いつでも・どこでもな利用を実現

2017-2026 レーザープラズマ駆動型加速器開発の概要 (MIRAI) 概念実証 (2020中間評価資料)

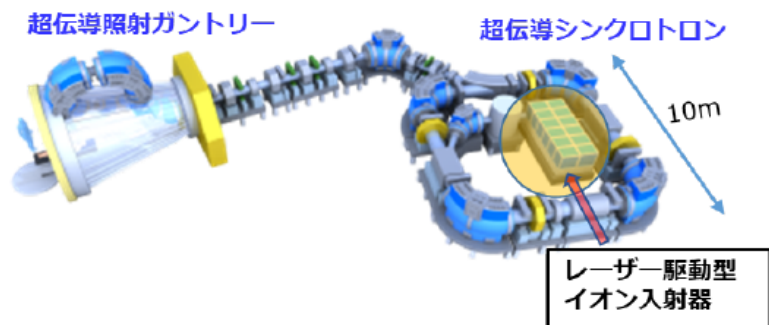
① レーザープラズマ電子加速器で卓上型X線FELの概観図



Visualization by T. Tajima, 2010

加速エネルギー	~ 2GeV
$\Delta E/E$	~ 0.1%
ビーム強度	> 10pC/b
繰り返し	> 10Hz
短周期アンジュレータによるEUV領域でのFEL	

② レーザー駆動型イオン入射器と量子メス重粒子線ガン治療装置概観図



加速エネルギー	4MeV/核子
C6+イオン数	> 108/パルス
$\Delta E/E$	<1% (バンチ加工後)
繰り返し	10Hz以上
炭素線純度	99%以上
重イオンがん治療装置の入射器	

レーザー	<10J
	数10フェムト秒
	>10Hz

2017年-2020年での開発方針(詳細は後の各セッションで報告)

利用分野に最適化された加速器システムの開発

と

高品質で安定なビームと低故障率の加速器システムの実現

LPA開発での課題解決の方策

加速器のビームの品質は粒子の発生源で決まる

品質を決めている要因の科学的理解のためプラットフォームを整備
実験と計算機シミュレーション

科学的な理解に基づいて工学システムとして機器開発を実施

レーザープラズマ電子源
炭素線生成薄膜ターゲットシステム
高強度レーザーシステムの開発

いずれもシステムの上流側機器から開発を実施

高エネルギー化と高強度化を多段システムで構築
安定な高強度レーザーシステムの構築を目指した機器開発

2020年 MIRAI中間評価実施

2021年以降 佐野PMがプロジェクトを主宰

為せば成る、

為さねば成らぬ何事も、

成らぬは

人の為さぬなりけり

息の長い加速器開発において

為すために研究者・技術者が持っていてほしい事

夢

感性

こだわり

出会い

思いやり

研究開発の活性化を実現するために

屯を作らない
(固定観念の排除)

多様な人材
(多様な発想)

魅力ある研究と環境
(長期的な視野)

ご静聴ありがとうございます
今後ともよろしく申し上げます

参考資料

通常型加速方式とレーザープラズマ加速方式の違い

加速器とは

電磁場の持つエネルギーを荷電粒子の運動エネルギーに変換する装置

エネルギーの変換は電磁的相互作用を通して行われるが

通常型RF駆動型加速とレーザー駆動型加速の原理的に違うところは

通常型 r f 駆動型加速器

金属や誘電体で構成した空洞内に注入された高周波電力により誘起される加速電界で電子の加速エネルギーが決まる。

ただし、加速電界強度の上限は金属及び誘電体表面での放電限界で決まり

$$E_0 \lesssim 100\text{MV/m程度}$$

レーザープラズマ駆動型加速器

加速電界強度の上限は、短パルスレーザーにより電子密度 n_0 のプラズマ内に誘起される疎密波の破壊電場（波として保てなくなる限界）で決まる。

1979年にT.Tajima and Dawson (Phys. Rev. Lett. 43 267-270.)

$$E_0 < 96\sqrt{n_0} \text{ [eV/m]}$$

$$n_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad E_0 \approx 100\text{GV/m}$$

レーザープラズマ駆動型加速器では1000倍ほど高い加速電界(V/m)が利用できる

加速器の小型化技術開発は、更なる高エネルギー化や高強度化と等価な技術

既存の加速器に比べビームの品質が5桁ほど低い

$$\text{品質} \propto \frac{I_b}{\varepsilon_x \varepsilon'_x \varepsilon_y \varepsilon'_y (\Delta E/E)}$$

エネルギー分散値が2桁ほど大きい
バンチ当たりの電荷量が3桁ほど低い

ビーム診断手法が未開発
バンチ長、微少電荷量、プラズマ分布や密度等情報

ビーム性能の再現性が低い

機器の信頼性が低い

炭素イオン生成薄膜標的の信頼性

課題解決の方策

電子およびイオン加速のプラットフォームを整備し、計算機シミュレーションと実験を通して、LPAプロセスを科学的に理解
その結果をもとに工学システムを構築・実証

LPAの課題

加速器の利用には高品質電子ビームの生成・加速が不可欠

電子ビームの高強度化(数pC/バンチからnC/バンチへ)

and

0.1%以下のエネルギー分散値

and

フェムト秒レベルのバンチ長

プラットフォームで

- ① 電子生成プラズマ条件の最適化
新規レーザー駆動型電子源の開発 $\Delta E/E$ の低減に効果
- ② バンチ長等ビーム品質の診断装置の開発
- ③ レーザーシステムの安定化

計算機

- ① ビームローディングのエネルギー分散への影響
- ② 空間電荷効果の影響